



## ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Effetti termici nella metrologia a coordinate (revisione 2020)

*Original*

Effetti termici nella metrologia a coordinate (revisione 2020) / Balsamo, Alessandro; Costelli, Gianfranco; Martelli, Giovanni; Ottone, Renato; Zaffagnini, Alberto. - Unico:(2020), pp. 1-52.

*Availability:*

This version is available at: 11696/58625 since: 2021-03-10T16:16:35Z

*Publisher:*

Associazione CMM Club Italia

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

Visibile a tutti

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# GUIDE TEMATICHE

## EFFETTI TERMICI NELLA METROLOGIA A COORDINATE



A cura della e distribuito dalla: Associazione CMM Club Italia  
Strada delle cacce, 91 – Torino  
[www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it)

Coordinamento editoriale: Giovanni Martelli  
Hanno redatto questa guida: Alessandro Balsamo  
Gianfranco Costelli  
Giovanni Martelli  
Renato Ottone  
Alberto Zaffagnini

Un ringraziamento a tutti gli autori degli articoli raccolti nel capitolo antologico di questa guida.

Un ringraziamento particolare a Renato Ottone che ha generosamente messo a disposizione il materiale che ne costituisce la struttura portante.

Finito di stampare: ottobre 2009

Copyright 1998-2017 – Associazione CMM Club Italia – Tutti i diritti riservati



# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## SOMMARIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
1.1	Scopo .....	3
1.2	Guida alla lettura .....	4
1.3	Applicabilità .....	4
<b>2</b>	<b>TERMINI E DEFINIZIONI.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>CONCETTI GENERALI E PRINCIPI FISICI .....</b>	<b>5</b>
3.1	Cenni di termodinamica .....	5
3.2	Temperatura.....	5
3.3	Calore .....	6
3.3.1	Calore specifico o capacità termica massica .....	7
3.4	Dilatazioni e contrazioni .....	8
3.5	Trasmissione del calore .....	8
3.5.1	Conduzione .....	9
3.5.2	Convezione .....	11
3.5.3	Irraggiamento .....	12
<b>4</b>	<b>EFFETTI TERMICI SULLA CMM .....</b>	<b>14</b>
	<b>PREMESSA .....</b>	<b>14</b>
4.1	Dilatazione e contrazione dei trasduttori.....	15
4.2	Deformazioni geometriche .....	16
4.3	Variazione del comportamento dinamico della CMM .....	17
<b>5</b>	<b>EFFETTI TERMICI SUL PEZZO.....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>TEMPERATURA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>ERRORI ED INCERTEZZE DI MISURA DOVUTI AGLI EFFETTI TERMICI.....</b>	<b>21</b>
7.1	Incertezza della stima dei coefficienti di dilatazione lineare .....	22
7.2	Incertezza nella misurazione delle temperature.....	24
7.3	Incertezza dovuta alla risposta termica .....	26
7.4	Dilatazione termica differenziale.....	28
7.5	Stima dell'incertezza composta e dell'incertezza estesa .....	30

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

	7.5.1	Incertezza composta.....	32
	7.5.2	Incertezza estesa.....	32
<b>7.6</b>		<b>Stima dell'errore termico e indice di errore termico TEI .....</b>	<b>32</b>
<b>7.7</b>		<b>Incertezza nelle misure dirette.....</b>	<b>34</b>
<b>7.8</b>		<b>Incertezza nelle misure per confronto.....</b>	<b>34</b>
<b>8</b>		<b>VERIFICA DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI.....</b>	<b>35</b>
	<b>8.1</b>	<b>Condizioni termiche.....</b>	<b>35</b>
	<b>8.2</b>	<b>Temperatura.....</b>	<b>35</b>
	<b>8.3</b>	<b>Umidità.....</b>	<b>36</b>
	<b>8.4</b>	<b>Portata e velocità dell'aria .....</b>	<b>36</b>
	<b>8.5</b>	<b>Vibrazioni .....</b>	<b>37</b>
	<b>8.6</b>	<b>Alimentazione elettrica .....</b>	<b>38</b>
	<b>8.7</b>	<b>Alimentazione pneumatica .....</b>	<b>39</b>
	<b>8.8</b>	<b>Caratteristiche metrologiche delle sale per CMM .....</b>	<b>40</b>
	8.8.1	Ambiente.....	40
<b>9</b>		<b>BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI.....</b>	<b>42</b>
	<b>9.1</b>	<b>Norme.....</b>	<b>42</b>
	<b>9.2</b>	<b>Articoli e testi.....</b>	<b>43</b>
<b>10</b>		<b>Coefficienti di dilatazione termica lineare dei materiali .....</b>	<b>45</b>

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## 1 INTRODUZIONE

---

### 1.1 Scopo

La norma ISO 10360-2 :2010 prescrive: “i limiti per le condizioni ambientali ammesse che possono avere influenza sulle misurazioni, quali condizioni di temperatura, umidità dell’aria e vibrazione nel luogo di installazione, devono essere specificati:

- dal fabbricante, nel caso di prove di accettazione;
- dall’utilizzatore, nel caso di prove di verifica periodica.

In entrambi i casi, l'utilizzatore è libero di scegliere le condizioni ambientali nelle quali saranno eseguite le prove secondo la ISO 10360-2, all'interno dei limiti specificati.”

La presente Guida si prefigge l’obiettivo di rendere disponibile all’utilizzatore di Macchine di Misura a Coordinate (di seguito CMM) una serie di indicazioni e informazioni relative principalmente alla grandezza di influenza temperatura ed ai suoi effetti nelle misurazioni dimensionali.

Affinché si possano ottenere le prestazioni dichiarate sui cataloghi, il costruttore di CMM dichiara, insieme alle specifiche tecniche della macchina, anche alcuni parametri ambientali che ritiene debbano essere mantenuti entro i limiti specificati. Ci si trova quindi subito di fronte al dilemma:

- Si è in grado di rispettare le condizioni ambientali prescritte?
- oppure si può sopraspedere ed accontentarsi di prestazioni finali diverse? E quali saranno queste nuove prestazioni?

Alle prime domande ne seguono altre:

- serve ottenere dalla macchina il massimo delle prestazioni dichiarate dal Costruttore oppure ci si può accontentare di qualcosa in meno?
- Tutte le volte che si effettuano misurazioni si è in grado di ricondurre i risultati delle misurazioni alla temperatura di riferimento?

Nel prossimo paragrafo vengono proposte alcune problematiche che sono frequentemente oggetto di domande da parte degli utilizzatori di CMM e alle quali la presente guida propone delle risposte, frutto di analisi ed esperienze maturate da coloro che hanno redatto articoli nelle riviste di settore.

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Il capitolo 2 indica quali sono i riferimenti per terminologia e definizioni .

I capitoli 3, 4, 5, 6, 7 e 8 sono il corpo centrale della guida e descrivono il fenomeno temperatura da un punto di vista fisico.

Il capitolo 9 presenta invece un'ampia bibliografia comprendendo nel contempo termini di riferimenti normativi, nonché articoli scritti da esperti del settore in vari ambiti: tutto ciò allo scopo di fornire materiale utile sia per un approfondimento dei temi trattati nella stessa guida, sia per supportare (grazie soprattutto alle esperienze già maturate e descritte nei vari articoli) coloro i quali si trovassero ad affrontare per la prima volta simili tematiche.

## ***1.2 Guida alla lettura***

Il Lettore troverà nel dettagliato sommario il miglior strumento per indirizzare la lettura di questo volume conformemente alle proprie esigenze.

Il suggerimento è quello di seguire i consigli proposti nel capitolo 2 (termini e definizioni), per poi proseguire con i capitoli 3-5-6 (temperatura e termodinamica: concetti generali e principi fisici).

Le dilatazioni termiche, la correzione dei loro effetti e l'incertezza delle correzioni sono trattate nel capitolo: 7.

Il capitolo 4 riguarda invece più specificatamente l'utilizzo delle CMM in ambiente industriale e gli effetti termici sui componenti delle CMM, mentre il capitolo 8 è utile per misurazioni con CMM nelle sale metrologiche.

Per chi abbia interessi più specifici il consiglio è di scorrere il capitolo 9 allo scopo di individuare gli articoli di approfondimento, molti dei quali reperibili nel sito del CMM Club.

## ***1.3 Applicabilità***

La Guida si rivolge quindi a tutti coloro che:

- già possiedono almeno una CMM e che vorrebbero migliorare le loro conoscenze riguardo all'ambiente che la ospita;
- hanno intenzione di acquistare una nuova CMM e devono scegliere in quale ambiente installarla.

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## 2 TERMINI E DEFINIZIONI

---

Questo documento fa riferimento ai termini e alle definizioni specifiche contenute nella UNI ISO/TR 16015. Si consiglia vivamente di proseguire la lettura della guida avendo a portata di mano la norma di riferimento (UNI EN ISO 10360-2), mentre per gli altri termini e definizioni si fa riferimento alla ISO 10360-1 e al VIM (Vocabolario Internazionale di Metrologia - CEI UNI 70099 – Terza Edizione)<sup>1</sup>.

## 3 CONCETTI GENERALI E PRINCIPI FISICI

---

### 3.1 Cenni di termodinamica

La termodinamica studia le proprietà dei sistemi per quanto riguarda le loro interazioni con l'ambiente circostante ed il trasferimento di energia tra corpi a temperature diverse, sotto forma di calore e di lavoro.

Un sistema termodinamico viene descritto da un numero limitato di grandezze fisiche, dette *coordinate termodinamiche* o *parametri di stato*, direttamente misurabili: ad esempio, nel caso di un fluido, il volume occupato da esso, la pressione esercitata su di esso e la temperatura. Quando i parametri di stato hanno valori definiti e costanti, il sistema si trova in uno *stato di equilibrio termodinamico*.

Si considerino due sistemi *A* e *B*, ciascuno dei quali in equilibrio termico. Se essi vengono messi a contatto termico tra di loro non rimangono generalmente in equilibrio ma evolvono verso uno stato di equilibrio termico comune. Si dice che i sistemi *eseguono una trasformazione termodinamica*.

### 3.2 Temperatura

La *temperatura* è l'indice dello stato termico di un corpo determinante per stabilire se due sistemi sono in equilibrio, appunto termico, tra di loro. Per determinare lo stato di equilibrio o di non equilibrio tra due sistemi si utilizza un *termometro* con una scala di temperatura riferita ad uno zero arbitrario (ad esempio la scala Celsius) oppure allo zero assoluto (scala termodinamica assoluta).

- 
- <sup>1</sup> Il VIM in Italiano è disponibile per consultazione on line al link: <http://www.ceinorme.it/it/lavori-normativi-it/vim/vim-contenuti.html>



## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Per tarare i termometri si usano i *punti fissi*, cioè stati riproducibili di un sistema opportuno a cui vengono assegnati determinati valori di temperatura.

Un punto fisso fondamentale è il *punto triplo dell'acqua*, cioè lo stato in cui coesistono in equilibrio acqua, ghiaccio, e vapor d'acqua.

Per definizione la temperatura del punto triplo dell'acqua è:

$$T_3 = 273,16 \text{ K}$$

Il kelvin (K) è definito come la frazione  $1/273,16$  della temperatura del punto triplo dell'acqua. La scala così determinata è chiamata *scala termodinamica assoluta* o *scala Kelvin*.

Nella pratica è molto usata la scala Celsius che viene definita attraverso la scala termodinamica assoluta.

Essa adotta come unità di misura il *grado Celsius* ( $^{\circ}\text{C}$ ) che ha la stessa grandezza del kelvin (K). Detta  $t$  la temperatura Celsius, la relazione che la definisce è la seguente:

$$t \text{ } ^{\circ}\text{C} = T \text{ K} - 273,15 \text{ K}$$

La temperatura del punto triplo dell'acqua vale pertanto  $0,01 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ . Lo *zero della scala Celsius* è la temperatura alla quale l'acqua satura di aria ed il ghiaccio sono in equilibrio alla pressione atmosferica normale ( $101\,325$  pascal), detta anche *punto di congelamento normale*. Essendo  $373,15 \text{ K}$  la temperatura alla quale l'acqua bolle (sempre alla pressione atmosferica normale, detta *punto di ebollizione normale*),  $100 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  è tale temperatura nella scala Celsius.

### 3.3 Calore

Il *calore* rappresenta una forma di energia in transito identificabile fra due sistemi a diverse temperature.

Se due sistemi in equilibrio vengono messi a contatto termico tra di loro non sono generalmente in equilibrio ed eseguono una trasformazione termodinamica per evolvere verso uno stato di equilibrio comune. L'energia scambiata tra i due sistemi prende il nome di *calore* o di *lavoro*. Si parla di calore se l'energia viene trasferita per effetto di una differenza di temperatura tra i due sistemi, si parla di lavoro in tutti gli altri casi.

Convenzionalmente il calore viene assunto positivo quando è somministrato dall'esterno ad un determinato sistema; negativo nel caso contrario.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Il calore, l'energia ed il lavoro sono grandezze equivalenti; nel sistema SI la loro unità di misura è il joule (J). Il joule è il lavoro compiuto dalla forza di 1 N quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 m nella sua propria direzione:  $1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$ .

L'unità tradizionale del calore era la kilocaloria, definita come la quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di 1 kg di acqua da  $14,5^\circ\text{C}$  a  $15,5^\circ\text{C}$  sotto una pressione di 760 mmHg.

Valgono le seguenti relazioni:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$$

### 3.3.1 Calore specifico o capacità termica massica

Per *calore specifico* (o meglio, *capacità termica massica*) si intende la quantità di calore  $c$  che bisogna fornire (o sottrarre) all'unità di massa di una sostanza per elevare (o abbassare) la sua temperatura di 1 K. :

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)} \quad \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$$

Il calore specifico di una stessa sostanza non è costante ma varia con la temperatura. Nella tabella 1 sono riportati i calori specifici per alcune sostanze solide e liquide.

Dall'analisi della tabella 1 appare evidente che l'acqua ha il più alto valore di calore specifico; quindi, a parità di variazione di temperatura fra una condizione iniziale ed un'altra finale, la quantità di calore assorbita o ceduta dall'acqua è molto più grande, a parità di massa, di quella relativa ad ogni altra sostanza: di qui l'interesse dell'acqua come fluido termovettore negli impianti termici.

Sostanza	$c$ (kJ/(kg K))	Sostanza	$c$ (kJ/(kg K))
Acciaio dolce	0,488	Olio combustibile	1,88
Acqua	4,18	Oro	0,131
Alcool etilico (95% vol.)	2,84	Ottone	0,389
Alluminio	0,942	Piombo	0,129
Bronzo	0,435	Platino	0,130
Duralluminio	0,912	Rame	0,385

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

<i>Sostanza</i>	<i>c</i> (kJ/(kg K))	<i>Sostanza</i>	<i>c</i> (kJ/(kg K))
Ferro puro	0,452	Stagno	0,226
Mercurio	0,138	Zinco	0,390

**Tabella 1: Calore specifico a 20 °C di alcune sostanze.**

### 3.4 Dilatazioni e contrazioni

Tutti i corpi, (solidi, liquidi e gassosi) subiscono variazioni dimensionali al variare della temperatura.

Il coefficiente di dilatazione  $\alpha$  (1/K) rappresenta l'incremento dell'unità di lunghezza per l'aumento della temperatura di 1 K. Si può infatti scrivere:

$$L_1 = L_0 + \alpha L_0 t_1 = L_0 (1 + \alpha t_1)$$

Dove  $L_0$  e  $L_1$  sono le lunghezze alle temperature di 0 °C e di  $t_1$  °C. Per un altro valore di temperatura  $t_2$  si può scrivere:

$$L_2 = L_0 (1 + \alpha t_2)$$

e si ricava pertanto:

$$L_2 = L_1 (1 + \alpha t_2) / (1 + \alpha t_1)$$

Che permette di ricavare la lunghezza  $L_2$  di un corpo alla temperatura  $t_2$ , nota la sua lunghezza  $L_1$  alla temperatura  $t_1$ .

<i>Sostanza</i>	<i><math>\alpha</math></i> (1/K)	<i>Sostanza</i>	<i><math>\alpha</math></i> (1/K)
Acciaio dolce	$12 \cdot 10^{-6}$	Oro	$14,2 \cdot 10^{-6}$
Alluminio	$23,6 \cdot 10^{-6}$	Ottone	$18,4 \cdot 10^{-6}$
Bronzo	$17,5 \cdot 10^{-6}$	Piombo	$29,3 \cdot 10^{-6}$
Duralluminio	$23,5 \cdot 10^{-6}$	Platino	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Ferro puro	$14 \cdot 10^{-6}$	Rame	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Ghisa	$10,4 \cdot 10^{-6}$	Zinco	$35,8 \cdot 10^{-6}$

**Tabella 2: Coefficienti di dilatazione lineare  $\alpha$  di sostanze solide**

### 3.5 Trasmissione del calore

Gli scambi di energia termica avvengono fra corpi a diversa temperatura secondo tre modi differenti: conduzione, convezione, irraggiamento. Spesso questi modi sono concomitanti.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Si parla di *conduzione termica* quando il calore si trasmette all'interno di un corpo (solido, liquido, gassoso) senza movimento di materia ma soltanto per scambi di energia cinetica delle molecole dalle zone a più alta temperatura, verso le molecole delle zone a bassa temperatura.

Il fenomeno della trasmissione di calore per *convezione* si ha quando il calore si propaga da un corpo solido a un liquido o a un gas (o viceversa) per effetto dello spostamento relativo delle particelle costituenti il fluido.

L'irraggiamento si ha, infine, quando la trasmissione di calore non avviene per contatto diretto fra due corpi bensì per effetto di onde elettromagnetiche. L'energia emessa da un corpo e incidente su di un altro in parte è riflessa, in parte è assorbita trasformandosi in calore mentre la rimanente attraversa il corpo stesso. Due corpi in un ambiente scambiano sempre energia per irraggiamento e quello a temperatura più alta cede energia a quello a temperatura inferiore.

### 3.5.1 Conduzione

La trasmissione di calore per conduzione è regolata dalla legge di Fourier. Se si considera una parete (di materiale omogeneo e isotropo) di estensione infinita, le cui pareti piane e parallele siano mantenute a temperature costanti  $t_1$  e  $t_2$ , e si indica con  $A$  ( $m^2$ ) la superficie di una sua parte e con  $s$  (m) il suo spessore si può scrivere:

$$q = A \frac{\lambda}{s} (t_1 - t_2) \quad (W)$$

dove  $q$  rappresenta la quantità di calore trasmessa nell'unità di tempo fra le due pareti, in regime stazionario, attraverso il materiale caratterizzato dal coefficiente  $\lambda$ . Tale coefficiente è chiamato *conduttività termica*, si esprime in  $W/(m \cdot K)$  e rappresenta, quindi, la quantità di calore che è trasmessa per unità di tempo, per unità di superficie e di spessore nonché per una differenza di temperatura di un grado.

Il valore della conduttività dipende dal materiale, dalle condizioni di temperatura e di pressione e può variare secondo la direzione del flusso termico (tipico è il caso delle sostanze anisotrope: nelle fibre di carbonio, per esempio, la conduttività è diversa se si considera il flusso lungo le fibre o in senso ad esse ortogonale).

Per quanto riguarda i solidi è utile tener presente le seguenti considerazioni:

- I materiali metallici e i conduttori elettrici hanno una conduttività  $\lambda$  più elevata dei materiali dielettrici.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

- La conduttività delle sostanze cristalline è superiore a quella delle sostanze amorfe.
- La conduttività dei solidi è superiore a quella dei liquidi e quella dei liquidi è maggiore di quella dei gas.

Nella tabella 3 sono riportati i coefficienti di conduttività  $\lambda$  per alcune sostanze.

<i>Sostanza</i>	$\lambda$ (W/(m K))	<i>Sostanza</i>	$\lambda$ (W/(m K))
Acciaio dolce	45,3	Oro	298
Alluminio	220	Ottone 70%Cu, 20%Zn	111
Bronzo 90%Cu,10%Sn	42	Piombo	35
Duralluminio	164	Platino	69
Ghisa 4% C	58	Rame	380
Granito	3,9	Zinco	110

**Tabella 3 – Conduttività di alcune sostanze solide a 20 °C**

Si dimostra che, se si considera uno strato di materiale omogeneo e isotropo di spessore  $s$  e di estensione infinita nelle altre due dimensioni, le cui pareti piane e parallele si trovino alla temperatura  $t_1$  e  $t_2$ , la temperatura nella sezione  $x$  è data da :

$$t_x = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{s} x$$

cioè la temperatura varia linearmente lungo lo spessore  $s$  passando da  $t_1$  a  $t_2$ .

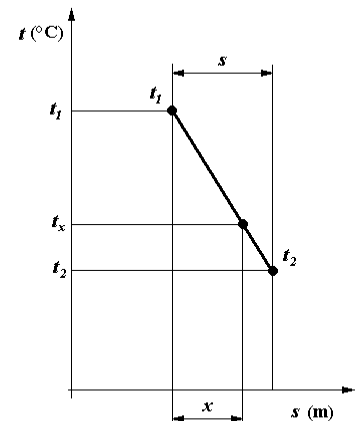


Figura 1. Parete semplice

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Nel caso di due strati di natura diversa, di spessori  $s_1$  e  $s_2$  e conduttività  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , se si indicano ancora con  $t_1$  e  $t_2$  le temperature delle due facce estreme e con  $t'$  la temperatura della superficie di separazione si può scrivere:

$$q = A \frac{\lambda_1}{s_1} (t_1 - t') = A \frac{\lambda_2}{s_2} (t' - t_2)$$

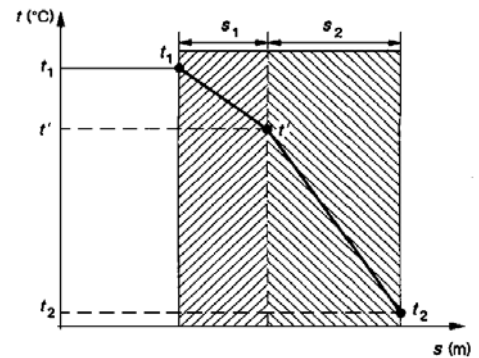


Figura 2. Parete composta

### 3.5.2 Convezione

Si parla di trasmissione di calore per convezione quando si ha un movimento macroscopico di particelle di fluido a contatto con la superficie del solido. Questo è il caso più comune delle applicazioni pratiche, anche se esistono casi di convezione fra liquidi e fra liquido e gas.

Se si indica con  $t_1$  la temperatura della superficie e con  $t_2$  la temperatura del fluido che la lambisce,

la relazione che esprime il flusso termico, definita da Newton nel 1701, è:

$$q = \alpha_c A (t_1 - t_2)$$

dove:

$q$  = flusso termico (potenza), W

$\alpha_c$  = coefficiente di convezione, W/(m<sup>2</sup>K)

$A$  = area della superficie di contatto, m<sup>2</sup>

Si parla di *convezione naturale* quando il movimento del fluido avviene per differenza di densità dovuta a differenza di temperatura; nel caso in cui il movimento del fluido sia dovuto ad un mezzo esterno (pompa, ventilatore o altro), la *convezione* è detta *forzata*.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Il coefficiente  $\alpha_c$  dipende da numerosi parametri quali la natura del fluido, le temperature, la velocità relativa, l'orientamento e le dimensioni delle superfici di scambio.

Nel caso della convezione naturale, per il calcolo del flusso termico si impiegano relazioni nelle quali si introducono parametri adimensionali quali il *numero di Nusselt*, il *numero di Grasshof* ed il *numero di Prandtl*.

Nel caso della convezione forzata si introduce il *numero di Reynolds*.

In tutti i casi pratici relativi all'utilizzazione di CMM è possibile applicare la seguente equazione semplificata relativa ad aria a temperatura prossima a 20 °C che lambisce pareti verticali:

$$\alpha_c = 5,62 \frac{W}{m^2 K} + 3,9 \frac{W_s}{m^3 K} w$$

con  $\alpha_c$  espresso in W/(m<sup>2</sup>K) e dove  $w$  è la velocità dell'aria espressa in m/s.

### 3.5.3 Irraggiamento

La trasmissione di calore per irraggiamento si ha per effetto della propagazione di onde elettromagnetiche, così come si propaga la luce. La potenza irradiata dalla superficie di un corpo in ciascuna direzione e per tutte le lunghezze d'onda è data dall'espressione di Stefan-Boltzmann:

$$q_s = c_n \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (W/m^2)$$

dove:

$c_n$  = indice di radiazione del corpo nero, vale 5,67 W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$T$  = temperatura assoluta del corpo in K

L'espressione è valida teoricamente solo per il corpo nero assoluto: pertanto per i corpi grigi la potenza irradiata diminuisce secondo la:

$$c = \varepsilon c_n$$

dove  $0 < \varepsilon < 1$  è detta *emissività*.

Nel caso in cui due corpi, rispettivamente a temperatura  $T_1$  e  $T_2$ , si “vedano” si può parlare di scambio per radiazione e il flusso termico si esprime con la relazione:

$$q = c_n \varepsilon_{12} F A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

dove:

$q$  = flusso termico in W

$c_n$  = indice di radiazione del corpo nero pari a  $5,67 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ;

$\varepsilon_{12}$  = coefficiente (minore dell'unità) che tiene conto dell'emissività dei due corpi;

$F$  = coefficiente geometrico (anch'esso minore di 1) che tiene conto della forma e della reciproca posizione dei corpi;

$A$  = superficie interessata allo scambio.

Nel caso di un corpo di piccolissima superficie rispetto all'ambiente che lo contiene, si può scrivere:

$$q = c_n \varepsilon_1 A_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

La tabella 4 riporta i valori di emissività per alcune sostanze.

<i>Sostanza</i>	<i>Natura della superficie</i>	$\varepsilon$
Acciaio	ossidato	0,8
Acciaio dolce	lucido	0,12
Alluminio	leggermente ossidato	0,20
Alluminio (lega)	lastre commerciali	0,065
Ferro	ossidato	0,7 – 0,9
Ferro	lucidato	0,07
Granito	lucidato	0,95
Nichel	nichelatura	0,045
Oro	molto lucidato	0,02
Ottone	molto lucidato	0,03
Rame	lucidato	0,04
Rame	ossidato	0,8
Specchio ideale		0

**Tabella 4 Valori di emissività per alcune sostanze a temperatura ambiente**



## 4 EFFETTI TERMICI SULLA CMM

---

### *PREMESSA*

Dal capitolo precedente ricordiamo che:

- Se due sistemi in equilibrio vengono messi a contatto termico tra di loro non sono generalmente in equilibrio ed evolvono verso uno stato di equilibrio termico comune;
- Corpi di natura diversa hanno capacità termica diversa ovvero, a parità di dimensione richiedono quantità di energia diverse per variare la loro temperatura;
- La trasmissione del calore avviene generalmente combinando fenomeni di conduzione, convezione e irraggiamento;
- Corpi di natura e dimensioni diverse tra di loro, se posti a contatto con un ambiente a temperatura diversa dalla loro propria, raggiungono uno stato di equilibrio termico con l'ambiente in tempi diversi;
- Corpi di natura diversa hanno coefficienti di dilatazione lineare diversi.

Oltre alle considerazioni precedenti dobbiamo ricordare anche che l'ambiente nel quale la CMM è immersa è sottoposto a fonti di perturbazione termica quali:

- La variazione della temperatura esterna all'ambiente per variazioni stagionali e giornaliere;
- La generazione di calore prodotta in modo variabile dai componenti attivi della CMM stessa;
- La trasmissione di calore prodotta dalla presenza di uno o più operatori (circa 240 W per ogni persona);
- L'accensione e lo spegnimento delle lampade di illuminazione ;
- La presenza di Personal Computer ( che danno più o meno lo stesso contributo termico di un operatore) o altre attrezzature elettroniche
- L'azione variabile di un eventuale sistema di condizionamento;
- Altre perturbazioni come ad esempio l'apertura delle porte.

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Le perturbazioni termiche producono variazioni dimensionali sui componenti della CMM; questi effetti sono più evidenti nella dilatazione e contrazione dei trasduttori e delle strutture, nelle deformazioni geometriche e nella variazione del comportamento dinamico della CMM.

## 4.1 Dilatazione e contrazione dei trasduttori

I trasduttori di posizione sono quegli elementi della CMM capaci di trasmettere all'unità di controllo o di calcolo le informazioni relative alla posizione dell'asse coordinato (o dell'asse rotante) al quale sono associati.

I trasduttori di posizione angolare non sono particolarmente influenzati dagli effetti termici se non utilizzati, attraverso opportuni organi di conversione del moto, per determinare spostamenti lineari.

I trasduttori di posizione lineare della CMM sono tipicamente scale accoppiate a cursori che forniscono direttamente un'informazione proporzionale alla lunghezza di uno spostamento rispetto ad una posizione di riferimento: sono quindi gli elementi che realizzano il campione di lunghezza locale di riferimento.

La variazione di temperatura delle scale ne provoca una variazione dimensionale. Questa variazione è proporzionale alla variazione di temperatura ed è funzione del coefficiente di dilatazione lineare  $\alpha$  del materiale (o dei materiali) che compongono il trasduttore secondo la relazione:

$$L_I = L_{20} (1 + \alpha t_I)$$

Dove  $t_I = t - 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Valori tipici di  $\alpha$  sono:

Scale in vetro:	$8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Scale in acciaio:	$11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Scale in <i>zerodur</i> :	prossimo a zero

Per scale in acciaio, se la temperatura media di una scala di 1 m viene innalzata di 1 °C, la scala stessa si allunga di 11,7 µm, vale a dire che per ottenere l'indicazione di spostamento relativo di 1 m della scala dovrò percorrere uno spostamento effettivo di 1000,011 7 mm.

È importante considerare che se la CMM stesse misurando un pezzo in acciaio e questo avesse la stessa temperatura della scala e lo stesso coefficiente di dilatazione lineare, l'allungamento del pezzo sarebbe identico all'allungamento della scala, annullando l'effetto.

In realtà questo è vero solo se il tempo di stabilizzazione termica del trasduttore è identico a quello del pezzo oppure se la temperatura si è mantenuta perfettamente costante per un periodo di tempo sufficiente a stabilizzare sia il trasduttore che il pezzo.

Nei casi reali, la variazione temporale e spaziale della temperatura provoca variazioni di indicazione del trasduttore. Inoltre, se la temperatura media del trasduttore è diversa dalla temperatura alla quale è stato tarato, la sua indicazione media non riproduce fedelmente il campione di lunghezza.

### 4.2 Deformazioni geometriche

Ricordiamo dalla sezione precedente che i corpi sono caratterizzati anche da un parametro detto *coefficiente di conduttività termica*  $\lambda$ , il quale varia in modo significativo tra materiali diversi: passiamo da 220 W/(m K) dell'alluminio a 3,9 W/(m K) del granito.

Componenti strutturali di materiali diversi vincolati rigidamente tra di loro, sottoposti a temperature variabili nel tempo, producono tensioni e deformazioni geometriche.

Componenti di materiali identici con masse sensibilmente diverse, sottoposti a temperature variabili nel tempo, si accorciano e si allungano in modo diverso a causa del diverso tempo di stabilizzazione.

Se si è poi in presenza di non uniformità di temperatura, il componente strutturale della CMM sottoposto a questi gradienti si deforma corrispondentemente. Per dare una sensazione pratica della deformazione dovuta ai gradienti spaziali di temperatura riportiamo un dato sperimentale: un piano

ideale in granito con sezione quadrata, lato di 1 m e spessore di 220 mm sottoposto ad un gradiente termico di 1 °C tra due superfici laterali opposte, altera la sua condizione di planarità di circa 10  $\mu\text{m}$ .

Altre deformazioni geometriche possono essere provocate dal calore prodotto localmente da elementi attivi come i motori della CMM oppure dalla presenza di perturbazioni esterne come una potente lampada che riscaldi una parte della struttura.

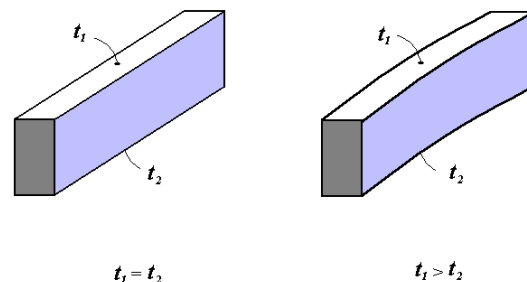


Figura 3. Deformazione della trave

un

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

In questa sede non viene trattato il caso della CMM sottoposta all'effetto diretto dell'irraggiamento solare, perché questa situazione dovrebbe sempre essere evitata dall'utilizzatore accorto.

## 4.3 *Variazione del comportamento dinamico della CMM*

E' stato visto nella sezione precedente che corpi di natura diversa sono caratterizzati da coefficienti di dilatazione lineare diversi.

Prendiamo allora in considerazione il carrello di alluminio schematizzato a lato, che scorre su una trave di granito ed è guidato su questa da pattini pneumostatici.

Innalzando la temperatura ambiente si ottiene una dilatazione termica differenziale tra il carrello e la trave con conseguente variazione del carico statico tra i pattini e la trave.

Questo effetto, se non fosse opportunamente compensato dal costruttore della CMM, produrrebbe una sensibile variazione nel comportamento dinamico della CMM stessa, in quanto verrebbe alterata la risposta alle sollecitazioni provocate dalle accelerazioni e decelerazioni degli elementi in movimento.

È importante ricordare che le condizioni ambientali non devono superare i limiti imposti dal costruttore della CMM.

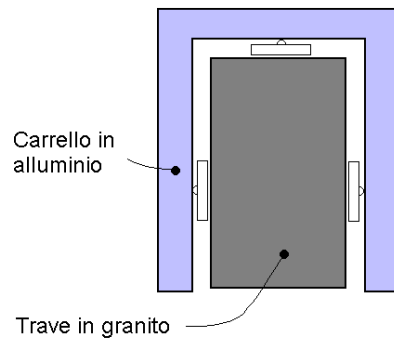


Figura 4. Carrello che scorre su una trave

## 5 EFFETTI TERMICI SUL PEZZO

---

Per poter determinare le caratteristiche dimensionali del pezzo occorre per prima cosa assicurarsi che il pezzo stesso abbia raggiunto uno stato di equilibrio termico con l'ambiente e con la CMM.

Se questo equilibrio non fosse stato ancora raggiunto si sarebbe sicuramente in presenza di dilatazioni o contrazioni del pezzo e, probabilmente, anche di deformazioni geometriche provocate dall'eventuale esistenza di sezioni fortemente asimmetriche e di gradienti spaziali.

L'effetto preponderante sarà comunque quello della dilatazione termica differenziale del pezzo rispetto ai trasduttori della CMM.

Per pezzi di grandi dimensioni è di fondamentale importanza assicurarsi che la temperatura media del pezzo sia sufficientemente prossima a quella della CMM ed a quella dell'ambiente.

Conoscendo le tolleranze che occorre verificare e conoscendo il coefficiente di dilatazione lineare del pezzo, si è in grado di stimare la massima differenza ammessa tra la temperatura media del pezzo e la temperatura della CMM.

Il pezzo è un contenitore di energia termica che, immerso in un ambiente con temperatura diversa dalla sua, si svuoterà attraverso un certo flusso termico.

L'energia contenuta nel pezzo dipende dalle caratteristiche specifiche del materiale che lo compone, quali il suo peso specifico e la sua capacità termica massica, e dipende anche dalla sua temperatura e dalla sua massa.

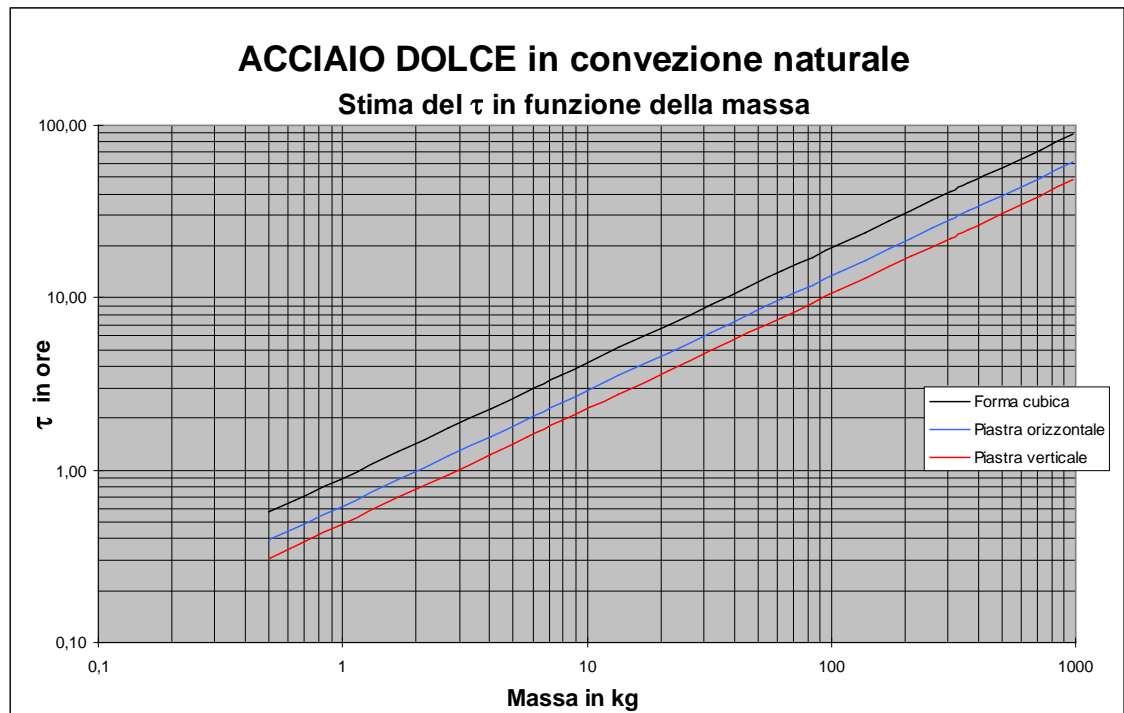
Il flusso termico con il quale avviene il trasferimento di energia dipende essenzialmente dal tipo di trasmissione di calore con la combinazione di fenomeni di conduzione, convezione e irraggiamento.

In ogni caso si è in presenza di fenomeni con andamento esponenziale nel tempo, che possono essere caratterizzati dalla costante di tempo  $\tau$ .

Ricordiamo che in un tempo pari a  $\tau$  (tempo caratteristico della esponenziale di temperatura  $= 1/h$  con  $h$  = coefficiente di trasferimento termico) avremo ridotto del 63,2 % la differenza di temperatura iniziale, in  $2 \tau$  dell'86,5 % ed in  $3 \tau$  la differenza di temperatura residua sarà del 5 %.

Nel caso di convezione naturale, il flusso termico è fortemente influenzato dalle superfici esposte.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI



**Figura 5:** Convezione naturale dell'acciaio dolce

Una stima ragionevole del *tempo di stabilizzazione* del pezzo può essere ottenuta utilizzando grafici come quello riportato in Figura 5 che indica il valore stimato di  $\tau$  per l'acciaio dolce in funzione della massa del pezzo e della sua forma approssimativa.

Si noti che un cubetto di acciaio dolce con 1 dm di lato impiega circa 3,5 ore per dissipare il 63,2% della sua energia termica e che questo tempo è di circa 90 ore per un pezzo di forma approssimabile a quella cubica e la cui massa sia di 1000 kg.

Non occorre preoccuparsi troppo delle lavorazioni interne al pezzo: le superfici generate dalle lavorazioni hanno poca incidenza, in quanto sono poco esposte al flusso di convezione.

Si ricordi che il tempo di stabilizzazione viene ridotto circa del 30% se si appoggia il pezzo su una grande massa di granito, mentre viene ridotto di circa l'80% se il pezzo viene appoggiato su una grande massa di ferro.

## 6 TEMPERATURA DI RIFERIMENTO

---

La temperatura normale di riferimento delle misure industriali di lunghezza è di 20 °C, come indicato dalla norma ISO 1.

L'attuale definizione della temperatura di riferimento è stata preceduta, storicamente, da almeno altre due: quella di 62 °F ( $16 + 2/3$  °C), adottata in Gran Bretagna almeno dal 1831, e quella di 0 °C, adottata dalla Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) di Parigi nel 1889. La temperatura di riferimento di 0 °C era la temperatura alla quale la barra campione di platino-iridio conservata al Bureau International des Poids et Mésures (BIPM) di Sèvres, vicino a Parigi, rappresentava fedelmente il metro.

A partire dal lontano 1898, il signor C.E. Johansson, svedese, (quello dei *blocchetti Johansson* !) determinò che la temperatura usuale in officina era compresa tra 15 °C e 25 °C e scelse la temperatura media di 20 °C come quella più facile da mantenere.

Nel 1903, Johansson fece misurare un blocchetto piano parallelo della lunghezza nominale di 100 mm dal BIPM e venne determinato che il blocchetto aveva la lunghezza di 100 mm alla temperatura di 20,63 °C. Con questa informazione, Johansson fece un nuovo blocchetto più lungo di 0,0007 mm di quello originale in modo tale che la sua lunghezza fosse pari a 100 mm alla temperatura di 20 °C. Questo secondo blocchetto è poi stato usato come riferimento per tarare lunghezze suddivise in modo da generare un set di blocchetti con diverse lunghezze.

A partire da questo inizio, l'uso dei 20 °C come temperatura di riferimento è cresciuto e nell'aprile del 1931 il Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM) sancì che, nel futuro, la temperatura di 20 °C sarebbe stata adottata universalmente come la temperatura normale di riferimento delle misure industriali di lunghezza.

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## 7 ERRORI ED INCERTEZZE DI MISURA DOVUTI AGLI EFFETTI TERMICI

---

La norma UNI EN ISO 1 indica qual è la temperatura di riferimento per le specifiche e le verifiche geometriche dei prodotti. La stessa norma avverte che

- tale indicazione influenza tutte le maglie della catena GPS;
- non è obbligatorio eseguire misurazioni dimensionali a 20 °C;
- che l'incertezza nella misurazione della temperatura e l'esecuzione di misurazioni dimensionali a temperature diverse da 20 °C conducono ad incertezze ed errori che inficiano il risultato delle misurazioni;
- rinvia la trattazione della relazione tra incertezza e temperatura alla UNI ISO/TR 16015,

Il principio fisico di base è quello che stabilisce che la maggior parte dei corpi si espande o si contrae quando la loro temperatura cambia.

Se la misurazione di lunghezza viene realizzata alla temperatura di riferimento, la dilatazione termica nominale è nulla, ma l'incertezza nella misurazione della temperatura introduce incertezza nel risultato della misurazione di lunghezza.

Se le misurazioni di lunghezza vengono realizzate a temperature diverse dalla temperatura di riferimento, esisterà una dilatazione termica differenziale. Questa sarà presente sia quando lo strumento di misura viene tarato per confronto con un campione sia quando viene utilizzato per determinare le dimensioni di un particolare meccanico.

Gli elementi che concorrono a determinare incertezza ed errori sistematici nella misurazione dimensionale possono essere così raggruppati:

- Incertezze nella stima o nella misurazione dei coefficienti di dilatazione lineare dello strumento, del campione e del pezzo da misurare;
- Incertezza nella misurazione delle temperature;
- Incertezza nella determinazione dei tempi di risposta termica delle varie parti che compongono lo strumento e dei tempi di risposta termica del campione e del pezzo da misurare;
- Eventuale errore determinato dalla non compensazione della dilatazione termica differenziale.



L'effetto globale degli errori generati dagli effetti termici deve essere determinato con l'accuratezza imposta dalle tolleranze dimensionali, deve essere documentato e composto con le incertezze proprie del processo di misurazione.

Ricordiamo che, nel caso specifico di utilizzazione di CMM nelle condizioni ambientali che si riscontrano normalmente in un laboratorio industriale, le incertezze e gli errori dovuti agli effetti termici possono raggiungere ampiezze maggiori di un ordine di grandezza di quelle attribuibili alla CMM stessa.

### 7.1 *Incertezza della stima dei coefficienti di dilatazione lineare*

Siamo interessati a conoscere le incertezze attribuibili al coefficiente di dilatazione termica:

- del campione che è stato utilizzato per tarare i trasduttori della CMM,
- dei trasduttori stessi della CMM
- del pezzo da misurare.

La determinazione del coefficiente di dilatazione lineare è tutt'altro che semplice. La sua misurazione è condotta con un'apparecchiatura chiamata *dilatometro*, in cui un campione del materiale da misurare (normalmente una barretta), viene riscaldato e viene misurata la sua variazione di lunghezza. Un altro metodo di misurazione è invece quello che prevede la misurazione della variazione di volume che risulta nella determinazione del coefficiente di dilatazione termica cubica

L'incertezza nella stima del coefficiente di dilatazione lineare può essere attribuita a:

- Differenze nella composizione chimica o fisica dell'oggetto reale rispetto al campione utilizzato per la misurazione del coefficiente;
- Scostamenti tra i valori reali ed i valori pubblicati, i quali sono la media dei risultati ottenuti da più esperimenti e da più sperimentatori.
- Differenze tra i valori ottenuti da pubblicazioni differenti.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

La figura 6<sup>2</sup> riporta un esempio di estrapolazione del coefficiente di dilatazione lineare partendo dalla determinazione della dilatazione e dalla misurazione della temperatura da parte di due diversi sperimentatori.

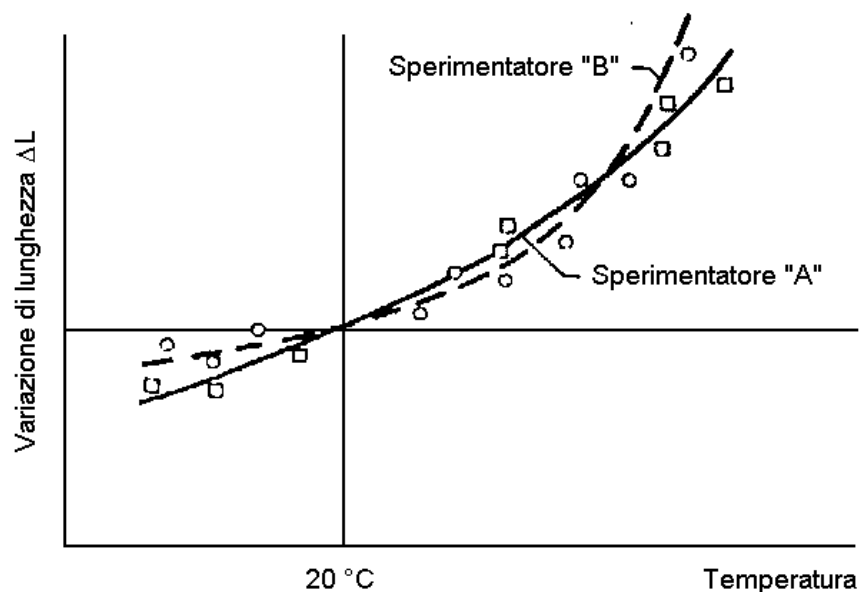


Figura 6. Misure di dilatazione termica

Il peso dell'incertezza nella determinazione del coefficiente di dilatazione lineare nella composizione dell'incertezza composta dovuta agli effetti termici, è funzione dello scostamento tra la temperatura media e la temperatura di riferimento.

Nelle applicazioni industriali si consiglia di ridurre la differenza tra la temperatura media dell'ambiente e la temperatura di riferimento e si considera accettabile attribuire i seguenti valori (semiampiezze di distribuzioni rettangolari simmetriche):

- $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  per i blocchetti piano paralleli in acciaio (come prescritto dalla UNI EN ISO 3650);
- $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  per i trasduttori della CMM (con esclusione dei trasduttori in zrodur);

---

<sup>2</sup> Figura tratta da UNI ISO/TR 16015 "Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) — Errori sistematici e contributi all'incertezza di misura nelle misure di lunghezza dovuti agli effetti termici"

- $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  per i pezzi in materiale ferroso.
- $3\text{-}4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  per i particolari in materiali in lega d'alluminio.

### 7.2 *Incerteza nella misurazione delle temperature*

La misurazione della temperatura è di fondamentale importanza per la determinazione degli effetti termici; in particolare si è interessati a:

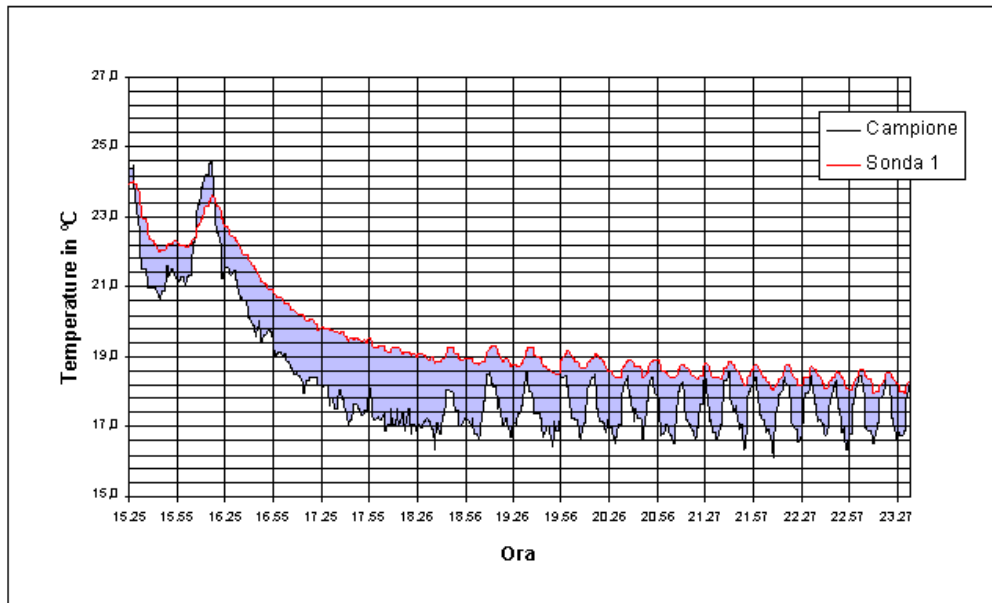
- Misurare e registrare la temperatura ambiente e le sue variazioni istantanee, giornaliere e stagionali;
- Determinare e quantificare la presenza di gradienti spaziali ricordando che i problemi maggiori derivano dalle stratificazioni verticali di temperatura;
- Determinare la temperatura media dei trasduttori e del pezzo e, nel momento della verifica delle prestazioni della CMM, determinare la temperatura media del campione di riferimento.

Misurare con la dovuta accuratezza le temperature è oggettivamente molto difficile.

Per quanto riguarda *la misurazione ed il registro delle variazioni della temperatura ambiente* i problemi maggiori possono essere:

- L'utilizzo di economici registratori settimanali a carta con modesta accuratezza e che non consentono un facile trasferimento delle informazioni a scapito di più costosi e performanti strumenti di registrazione automatica.
- La scarsa informazione dell'utilizzatore sulla pratica di misurazioni accurate della temperatura ambiente. Un esempio tipico di questo problema è rappresentato dall'uso, ragionevolmente diffuso, di sonde con costante di tempo di qualche minuto utilizzate per la misurazione di variazioni di temperatura con cicli dell'ordine di 15 minuti imposti dai comuni sistemi di condizionamento non proporzionali.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI



**Figura 7. Sonda 1 con ritardo ed influenza esterna**

- La scarsa sensibilizzazione dell'utilizzatore sull'importanza della misurazione dei gradienti verticali. È diffuso l'uso di un unico termometro per la misurazione della temperatura ambiente nella sala della CMM (purtroppo è altrettanto diffusa l'assenza completa di termometri!).

La *determinazione della temperatura media dei trasduttori* è resa complicata dalle seguenti situazioni:

- La quasi totalità delle CMM installate non prevede punti di facile installazione di eventuali sonde di temperatura. Diventa praticamente impossibile ottenere una informazione adeguata sulla temperatura dei trasduttori senza smontare componenti della CMM;
- Spesso i trasduttori sono incapsulati con conseguente impossibilità da parte dell'utilizzatore di accedere al trasduttore stesso. In questi casi la misurazione della temperatura del trasduttore viene interpretata misurando la temperatura superficiale dell'involucro.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

La *determinazione della temperatura media del pezzo* è affetta dai seguenti problemi:

- Non si può perforare il pezzo per introdurre vari termometri, quindi ci si limita a misurare la temperatura superficiale;
- È molto facile commettere errori grossolani di apprezzamento dovuti all'utilizzazione di sonde a contatto che non trasmettono l'informazione della temperatura superficiale bensì la composizione di questa con la temperatura dell'aria che lambisce la parte esposta della sonda.

Da un punto di vista pratico, in laboratori di “ambiente industriale”, si possono assumere i seguenti valori come rappresentativi (semiampiezze di distribuzioni rettangolari simmetriche):

- 2 °C di variazione stagionale della temperatura ambiente media;
- 1 °C di variazione giornaliera della temperatura ambiente media;
- 1 °C di ciclo del sistema di condizionamento;
- 0,5 °C/m di gradiente verticale di temperatura;
- Assenza di misurazione della temperatura dei trasduttori con conseguente stima di concordanza con la temperatura ambiente e probabile errore di apprezzamento di 0,5 °C;
- 2 °C nella stima della temperatura del pezzo che, nella grande maggioranza dei casi, non viene misurata.

### 7.3 *Incertezza dovuta alla risposta termica*

La *risposta termica* viene definita come l'ampiezza di variazione di lunghezza di un oggetto sottoposto ad una oscillazione sinusoidale della temperatura ambiente ed è funzione sia dell'ampiezza che della frequenza dell'oscillazione stessa.

Oggetti di natura diversa e di masse diverse, sottoposti alla stessa perturbazione ciclica della temperatura, avranno risposta termica diversa.

Possiamo intuitivamente immaginare che la variazione di lunghezza, in una determinata direzione, di un cubo di acciaio di 200 mm di lato (con una massa stimata di circa 62 kg) sia significativamente diversa dalla variazione di lunghezza della prolunga di alluminio da 200 mm, che sostiene il tastatore elettronico della CMM, quando entrambi sono sottoposti ad una variazione di temperatura di 2 °C con un ciclo ripetitivo che dura circa 15 minuti: il cubo di

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

acciaio ha una costante di tempo di circa 10 ore quindi la sua risposta termica (variazione di lunghezza) sarà praticamente nulla nel ciclo di 15 minuti di periodo, mentre la variazione di lunghezza della prolunga di alluminio seguirà fedelmente, e con un ritardo minimo, la variazione di temperatura.

Riportiamo il valore ottenuto da una verifica sperimentale con le seguenti condizioni:

- Ampiezza totale dell'oscillazione della temperatura: 2,4 °C;
- Periodo dell'oscillazione: ~ 12 minuti (l'oscillazione presenta un andamento praticamente sinusoidale);
- Il misurando è la variazione di lunghezza della prolunga di alluminio da 100 mm.

Il risultato dell'esperimento indica una variazione di lunghezza della prolunga di 3,5 µm.

In sintesi possiamo affermare che, per una determinata variazione della temperatura ambiente, avremo risposte termiche (variazioni di lunghezza) diverse per corpi diversi ed avremo tempi di stabilizzazione termica diversi per corpi diversi.

Nel caso di utilizzazione di CMM, possiamo considerare i vari componenti strutturali della macchina come corpi a bassa risposta termica mentre il canotto e gli elementi del tastatore elettronico sono corpi con risposta termica sensibilmente maggiore.

La risposta termica del pezzo sarà funzione della massa e della capacità termica del materiale di cui è composto.

Nell'esecuzione di una misurazione con la CMM saremo sicuramente in presenza di risposte termiche differenziali tra la CMM stessa ed il pezzo (oppure il campione, nel caso di verifica delle prestazioni).

La *risposta termica differenziale* ( $E_{TVE}$ ) è la stima della possibile variazione nella misurazione della lunghezza, indotta unicamente dalla deviazione della temperatura ambiente dalla temperatura media, durante un tempo equivalente al tempo di esecuzione della misurazione. L' $E_{TVE}$  è determinata dal risultato di un test di deriva nel caso di misure dirette oppure dal confronto di due test di deriva nel caso di utilizzazione della CMM come comparatore.

Un *test di deriva* è un esperimento condotto per determinare la variazione nel risultato di una misurazione generata da un sistema di misura in condizioni normali di operazione, eseguito durante un determinato periodo di tempo.

Notiamo che, per la determinazione dell'incertezza da attribuire alla nostra misura con la CMM, non siamo tanto interessati a determinare il valore di  $E_{TVE}$  quanto a determinare l'incertezza  $u_{ETVE}(L)$  da attribuire alla lunghezza misurata. Questa considerazione è molto importante per evitare di contare due volte le varie componenti di incertezza.

Ricordiamo, infatti, che se il test di deriva fosse eseguito durante un tempo sufficientemente lungo (ad esempio l'orario di lavoro giornaliero del laboratorio), tempo questo capace di riprodurre le variazioni cicliche più significative delle condizioni ambientali, e la lunghezza verificata durante il test stesso fosse il nostro misurando, l' $E_{TVE}$  risultante rappresenterebbe, in prima approssimazione, la quasi totalità dell'incertezza che vogliamo determinare analizzando le varie componenti.

Suggeriamo che le variazioni della temperatura ambiente vengano registrate durante il test di deriva. Saranno molto utili per poter generare una stima grossolana dell' $E_{TVE}$  in condizioni simili.

Ricordiamo inoltre che è improprio non tenere conto dell'incertezza dovuta alla risposta termica  $u_{ETVE}(L)$  e che è indispensabile determinarla con l'analisi dei risultati di un test di deriva.

### 7.4 Dilatazione termica differenziale

La *dilatazione termica differenziale* è la differenza tra la variazione di lunghezza del pezzo e quella del campione in risposta allo scostamento tra la loro temperatura al momento della misurazione e la temperatura di riferimento di 20 °C.

La stima della dilatazione termica del pezzo tra 20 °C e la sua temperatura media al momento della misurazione è data dalla seguente relazione:

$$\Delta_{Ep} = \alpha_p L_p (T_p - 20)$$

dove:

$\alpha_p$  è la stima del coefficiente di dilatazione lineare del pezzo

$L_p$  è la lunghezza che il pezzo avrebbe a 20 °C

$T_p - 20$  è la differenza tra la temperatura media del pezzo e 20 °C.

La stima della dilatazione termica del campione tra 20 °C e la sua temperatura media al momento della misurazione è data dalla seguente relazione:

$$\Delta_{Ec} = \alpha_c L_c (T_c - 20)$$

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

dove:

$\alpha_c$  è la stima del coefficiente di dilatazione lineare del campione

$L_c$  è la lunghezza che il campione avrebbe a 20 °C

$T_c - 20$  è la differenza tra la temperatura media del campione e 20 °C.

La dilatazione termica differenziale è quindi:

$$\Delta_{DE} = \Delta_{Ep} - \Delta_{Ec} = \alpha_p L_p (T_p - 20) - \alpha_c L_c (T_c - 20)$$

ammettendo che al momento della misurazione pezzo e campione abbiano lo stesso valore  $L$ , sarà:

$$\Delta_{DE} = L (\alpha_p (T_p - 20) - \alpha_c (T_c - 20))$$

Nelle misurazioni dirette eseguite con CMM, il campione è il trasduttore di misura e la dilatazione termica differenziale è nulla se la temperatura del pezzo e la temperatura del trasduttore sono di 20 °C.

Nel caso in cui la temperatura del pezzo e quella del trasduttore fossero uguali tra di loro ma diverse da 20 °C, la dilatazione termica differenziale è nulla solo se i coefficienti di dilatazione lineare del pezzo e del trasduttore sono identici.

Da un punto di vista pratico, nelle applicazioni industriali, è comune registrare la seguente situazione:

- 2 K di variazione annuale della temperatura media del laboratorio rispetto a 20 °C
- 1 K di variazione giornaliera della temperatura ambiente media
- Trasduttore in vetro (con coefficiente di dilatazione lineare di circa  $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )
- Pezzo in acciaio (con coefficiente di dilatazione lineare di circa  $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

La stima della dilatazione termica differenziale, nelle condizioni descritte, sarà:

$$\Delta_{DE} = L (\alpha_p (T_p - 20) - \alpha_c (T_c - 20))$$



## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

ovvero:

$$\Delta_{DE} = L (12 \cdot 10^{-6} \cdot 3 - 8 \cdot 10^{-6} \cdot 3) = L \cdot 12 \cdot 10^{-6}$$

per  $L$  di 1 m la stima della dilatazione termica differenziale è quindi di 12  $\mu\text{m}$ .

Qualora fossimo in presenza di differenza di temperatura tra il pezzo ed il trasduttore (situazione questa molto probabile nella pratica) la dilatazione termica differenziale potrebbe essere sensibilmente maggiore. Nell'esempio precedente, se il pezzo avesse una temperatura di 2 °C maggiore di quella del trasduttore, la  $\Delta_{DE}$  sarebbe di 36  $\mu\text{m}$  !

La dilatazione termica differenziale non è un'incertezza: è un errore sistematico che viene compensato in modo automatico da alcuni tipi di CMM. Altre CMM sono predisposte per la compensazione manuale della dilatazione termica differenziale, incombendo all'operatore il compito di misurare la temperatura del trasduttore e la temperatura del pezzo e di digitare i valori corrispondenti associati ai coefficienti di dilatazione lineare.

Bisogna ricordare, comunque, che anche nel caso di compensazione della dilatazione termica differenziale, non vengono annullate le incertezze associate alla stima dei coefficienti di dilatazione lineare, alla stima o alla misurazione delle temperature ed alla risposta termica del sistema CMM – pezzo.

### 7.5 Stima dell'incertezza composta e dell'incertezza estesa

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, le componenti di incertezza dovute agli effetti termici sono la conseguenza di:

- Incertezze nella stima o nella misurazione dei coefficienti di dilatazione lineare del trasduttore  $u(\alpha_c)$  e del pezzo da misurare  $u(\alpha_p)$ ;
- Incertezza nella misurazione della temperatura del trasduttore  $u(T_c)$  e del pezzo  $u(T_p)$  ;
- Incertezza nella determinazione dei tempi di risposta termica delle varie parti che compongono lo strumento, del campione e del pezzo da misurare  $u_{ETVE}(L)$

L'incertezza con la quale sono conosciuti i coefficienti di dilatazione lineare, in presenza di compensazione termica, ha come conseguenza un'incertezza nella determinazione delle lunghezze.

Per il trasduttore avremo:  $u_E(L_c) = L_c (T_c - 20) u(\alpha_c)$

Per il pezzo avremo:  $u_E(L_p) = L_p (T_p - 20) u(\alpha_p)$

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

dove:

$T_c$  è la temperatura media del trasduttore

$T_p$  è la temperatura media del pezzo

$\alpha_c$  è il coefficiente di dilatazione lineare del trasduttore

$\alpha_p$  è il coefficiente di dilatazione lineare del pezzo

La componente di incertezza nella determinazione della lunghezza dovuta all'incertezza dei coefficienti di dilatazione lineare è la composizione quadratica dell'incertezza nella determinazione della lunghezza del trasduttore e dell'incertezza nella determinazione della lunghezza del pezzo ovvero:

$$u_{DE}(L) = \sqrt{u_E^2(L_c) + u_E^2(L_p)} = \sqrt{L_c^2 (T_c - 20)^2 u^2(\alpha_c) + L_p^2 (T_p - 20)^2 u^2(\alpha_p)}$$

Nell'ipotesi probabile che  $L_c$  e  $L_p$  siano nominalmente uguali, essi possono essere confusi (errore del secondo ordine) con il valore nominale  $L$  e quindi:

$$u_{DE}(L) \approx L \sqrt{(T_c - 20)^2 u^2(\alpha_c) + (T_p - 20)^2 u^2(\alpha_p)}$$

L'incertezza con la quale sono conosciute le temperature medie ha come conseguenza un'incertezza nella determinazione delle lunghezze.

Per il trasduttore avremo:  $u_T(L_c) = L_c u(T_c - 20) \alpha_c$

Per il pezzo avremo:  $u_T(L_p) = L_p u(T_p - 20) \alpha_p$

dove:

$T_c$  è la temperatura media del trasduttore

$T_p$  è la temperatura media del pezzo

$\alpha_c$  è il coefficiente di dilatazione lineare del trasduttore

$\alpha_p$  è il coefficiente di dilatazione lineare del pezzo

La componente di incertezza nella determinazione della lunghezza dovuta all'incertezza delle temperature medie, ammettendo la non correlazione tra le misurazioni delle

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

temperatura, è la composizione quadratica dell'incertezza nella determinazione della lunghezza del trasduttore e dell'incertezza nella determinazione della lunghezza del pezzo ovvero:

$$u_{TM}(L) = \sqrt{u_T^2(L_c) + u_T^2(L_p)} = \sqrt{L_c^2 u^2(T_c - 20) \alpha_c^2 + L_p^2 u^2(T_p - 20) \alpha_p^2}$$

Con la stessa ipotesi formulata precedentemente e cioè che sia probabile che  $L_c$  e  $L_p$  siano nominalmente uguali, essi possono essere “confusi” (errore del secondo ordine) con tale valore nominale  $L$ , possiamo semplificare come segue:

$$u_{TM}(L) \approx L \sqrt{u^2(T_c - 20) \alpha_c^2 + u^2(T_p - 20) \alpha_p^2}$$

### 7.5.1 Incertezza composta

L'incertezza composta risultante dagli effetti termici è la composizione quadratica dell'incertezza dovuta ai coefficienti di dilatazione lineare  $u_{DE}(L)$ , dell'incertezza dovuta alle temperature  $u_{TM}(L)$  e dell'incertezza derivante dalla risposta termica  $u_{ETVE}(L)$ .

$$u_{cT}(L) = \sqrt{u_{DE}^2(L) + u_{TM}^2(L) + u_{ETVE}^2(L)}$$

### 7.5.2 Incertezza estesa

L'incertezza estesa risultante dagli effetti termici, ipotizzando una distribuzione normale ed applicando un fattore di copertura 2 per ottenere un livello di confidenza pari a circa 95% è:

$$U_T = 2u_{cT}(L)$$

### 7.6 Stima dell'errore termico e indice di errore termico TEI

Il termine inglese *Thermal Error* (errore termico) è stato storicamente utilizzato per individuare gli errori e le incertezze di misurazione attribuibili agli effetti termici ed è la somma tra il valore assoluto della dilatazione termica differenziale  $\Delta_{DE}$  e l'incertezza estesa  $U_T$ .

$$TE = \left| \Delta_{DE} \right| + U_T$$

Dobbiamo notare che si tratta di una somma e non della composizione quadratica in quanto  $\Delta_{DE}$  è un errore sistematico e non un'incertezza.

Nel caso di misurazioni realizzate con CMM dotate di compensazione termica automatica e nel caso di applicazione della compensazione termica manuale su CMM predisposte per tale funzione, il valore di  $\Delta_{DE}$  è nullo e  $U_T$  è l'unica componente dell'errore termico  $TE$ .

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## ATTENZIONE!

La dilatazione termica differenziale  $\Delta_{DE}$  non è un'incertezza bensì un errore sistematico. Quando dovremo comporre l'incertezza dovuta agli effetti termici con le altre componenti di incertezza che concorrono a determinare l'incertezza di misura dovremo prima comporre quadraticamente le varie componenti e quindi sommare al risultato il valore assoluto di  $\Delta_{DE}$ .

## INDICE DI ERRORE TERMICO

L'indice di errore termico  $TEI$  è il rapporto percentuale tra l'errore termico  $TE$  e 1/2 della tolleranza  $TOL$  o, preferibilmente, il rapporto percentuale tra  $TE$  e l'incertezza obbiettivo  $U_{TARGET}$  da noi ritenuta necessaria per la misurazione:

$$TEI = (2TE / TOL) \cdot 100$$

oppure:

$$TEI = (TE / U_{TARGET}) \cdot 100$$

L'indice di errore termico  $TEI$  è un indicatore molto importante in quanto permette di evidenziare quanta parte del nostro margine di tolleranza viene “speso” per gli effetti termici.

È opportuno attirare l'attenzione del lettore sulle seguenti considerazioni di carattere generale:

- La maggior parte dei progettisti meccanici tende a dimenticare la presenza degli effetti termici e tende a definire tolleranze di lavorazione più strette di quelle normalmente realizzabili e misurabili;
- Il disegno del pezzo (la specifica) raramente riporta informazioni accurate sul coefficiente di dilatazione del materiale che compone il pezzo stesso;
- Vale sicuramente la pena di realizzare a priori la stima grossolana del  $TE$  associato alle condizioni ambientali del nostro laboratorio ed ai principali materiali che compongono i pezzi che dovremo misurare.
- Prima di accingerci a realizzare la misurazione del pezzo dobbiamo calcolare l'indice di errore termico  $TEI$  per le tolleranze dimensionali associate ai misurandi di maggiore lunghezza. Se  $TEI$  supera il 50% siamo probabilmente nei guai!

### 7.7 *Incertezza nelle misure dirette*

Vengono definite *misure dirette* quelle che sono realizzate utilizzando la CMM come campione dimensionale per determinare direttamente le caratteristiche geometriche del pezzo da misurare. Si tratta dell'applicazione tipica delle CMM.

Nel caso di misure dirette valgono tutte le considerazioni precedenti relative agli errori ed alle incertezze derivanti dagli effetti termici.

Nell'esecuzione di misure dirette, oltre alle incertezze ed errori di origine termica, saremo in presenza di importanti componenti di incertezza derivanti dalle deformazioni geometriche e da tutti i componenti della CMM e dalla sua capacità di riprodurre il campione di lunghezza.

### 7.8 *Incertezza nelle misure per confronto*

Nelle misure per confronto la CMM viene utilizzata come un comparatore per indicare la differenza tra le dimensioni del pezzo e le dimensioni del campione.

Nelle misure per confronto, a differenza delle misure dirette, vengono minimizzati gli effetti delle componenti di incertezza derivanti dalle caratteristiche fisiche della CMM e del tastatore.

Trattandosi di misurazioni per differenza su lunghezze teoricamente uguali, si tendono ad eliminare anche le incertezze di origine termica associate ai componenti della CMM purché le condizioni ambientali vengano mantenute sufficientemente stabili, ma entrano in gioco le incertezze di origine termica associate al campione.

In prima approssimazione è possibile affermare che l'entità di  $U_T(L)$  è dello stesso ordine di grandezza dell'incertezza estesa calcolata per misure dirette e tende ad essere minore di questa se le condizioni ambientali sono mantenute stabili tra le due misurazioni origine del confronto in quanto tende a diminuire l'entità di  $u_{ETVE}(L)$ .

Bisogna inoltre notare che nella determinazione di  $\Delta_{DE}$  intervengono i coefficienti di dilatazione lineare del campione fisico e del pezzo anziché quelli del trasduttore e del pezzo.

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## 8 VERIFICA DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI

---

Le *condizioni ambientali* sono tutte quelle condizioni alle quali la CMM è sottoposta e che devono essere mantenute sotto controllo entro limiti accettabili al fine di assicurare le prestazioni della CMM stessa. Comprendono le condizioni termiche, i limiti di vibrazioni indotte, l'alimentazione elettrica (tensione e corrente) e (quando presente) l'alimentazione pneumatica (pressione, umidità e grado di pulizia).

Il costruttore deve specificare chiaramente le condizioni entro le quali le prestazioni della CMM sono garantite e deve definire le condizioni limite che possono pregiudicare il funzionamento della CMM. L'utilizzatore ha l'onere di verificare che esse siano in conformità con le specifiche del costruttore.

### 8.1 Condizioni termiche

Le condizioni termiche comprendono tipicamente i seguenti parametri:

- Massima scostamento della temperatura media dalla temperatura di riferimento di 20 °C;
- Massima variazione della temperatura in un determinato periodo di tempo (tipicamente 1 ora);
- Massima ampiezza dei gradienti di temperatura nello spazio;
- Limiti per l'umidità relativa
- Eventuali limiti per la portata e la velocità dell'aria nell'ambiente di lavoro.

Nel caso di utilizzazione della CMM al di fuori delle specifiche definite dal costruttore, l'utilizzatore deve essere cosciente del fatto che le prestazioni della CMM saranno degradate ed è suo compito determinare la compatibilità di tali prestazioni con i suoi obiettivi di accuratezza.

La verifica delle condizioni termiche è indispensabile. Eseguire misurazioni con una CMM senza conoscere l'andamento delle condizioni termiche e senza aver stimato l'effetto di tali condizioni sulle misurazioni è privo di significato.

### 8.2 Temperatura

È necessario registrare permanentemente la temperatura media dell'ambiente in quanto non basta assicurare che la temperatura sia mantenuta entro limiti accettabili durante l'esecuzione

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

delle misurazioni. I componenti strutturali di una CMM possono avere tempi di stabilizzazione termica di alcuni giorni: spegnere il condizionatore durante il fine settimana può voler dire eseguire misurazioni errate di lunedì.

L'accuratezza del termometro registratore deve essere compatibile con l'ampiezza della massima variazione di temperatura che deve essere mantenuta sotto controllo (tipicamente 20%).

Si consiglia di equipaggiarsi, almeno, con un termometro registratore a carta capace di registrare la temperatura durante una settimana con accuratezza di  $\pm 1$  °C e con un termometro digitale con due sonde con termoresistenze al platino: una per la misurazione dell'aria e la seconda per la misurazione a contatto. Il termometro digitale deve avere almeno 0,1 °C di risoluzione e 0,2 °C di accuratezza. Potrà essere usato per la misurazione delle variazioni della temperatura ambiente, per la misurazione dei gradienti temporali e spaziali di temperatura e per la misurazione della temperatura del pezzo e dei trasduttori. Il termometro digitale potrà inoltre essere utilizzato per la taratura parziale del termometro registratore nel campo di temperatura di interesse.

### 8.3 *Umidità*

I limiti per la variazione dell'umidità relativa, definiti dal costruttore, sono spesso dovuti dalla presenza di materiali sensibili all'umidità nella composizione della CMM (tipicamente il granito). L'umidità relativa deve essere misurata e la sua variazione deve essere mantenuta entro i limiti prescritti.

L'accuratezza dell'igrometro deve essere compatibile con il campo di variazione consentito (tipicamente 20% del campo)

Oltre alle specifiche del costruttore della CMM, nella definizione dei limiti di controllo dell'umidità relativa interviene anche il limite massimo normalmente imposto per laboratori di taratura dimensionale che è di 50%.

Devono essere valutate anche le condizioni di benessere dell'operatore, associando l'umidità relativa alla temperatura ed alla velocità dell'aria ed è necessario ricordare che l'umidità relativa molto bassa favorisce l'accumulo di cariche elettrostatiche.

### 8.4 *Portata e velocità dell'aria*

La portata e la velocità dell'aria sono raramente specificate dal costruttore della CMM ma intervengono nella definizione del sistema termico al quale la CMM ed il pezzo sono sottoposti.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

La portata è molto difficile da misurare e comunque non è critica per le misurazioni con CMM.

La velocità dell'aria dovrebbe essere misurata per stimare i coefficienti di convezione. Ricordiamo che aumentando la velocità dell'aria aumenta in modo significativo il coefficiente di convezione, il che da un lato è positivo poiché diminuisce il tempo di stabilizzazione del pezzo ma dall'altro può essere negativo aumentando la sensibilità di componenti del sistema di misura con piccole masse, che in questo modo tenderebbero a seguire maggiormente le variazioni cicliche del sistema di condizionamento.

Devono essere valutate anche le condizioni di benessere dell'operatore.

### 8.5 *Vibrazioni*

La superficie di supporto sulla quale la CMM viene montata può avere movimenti indotti da forze esterne applicate nell'area circostante generate, ad esempio, da altre macchine, carrelli trasportatori, compressori, ecc. Questi movimenti possono essere vibrazioni continue o colpi e se vengono trasmessi alla CMM hanno per effetto la degradazione delle sue prestazioni di accuratezza e ripetibilità in quanto generano movimenti relativi indesiderati tra il tastatore, i trasduttori di posizione ed il pezzo.

Il costruttore della CMM definisce normalmente la massima ampiezza di vibrazioni a determinate frequenze ed in alcuni casi fornisce le indicazioni di massima per la realizzazione di fondazioni adeguate per assicurare il buon funzionamento della CMM.

La misurazione dell'ampiezza e della frequenza delle vibrazioni dovrebbe essere realizzata nei punti di interfaccia tra la struttura di appoggio predisposta dall'utilizzatore e gli appoggi della CMM (compresi gli eventuali appoggi anti-vibrazione se questi sono di fornitura del costruttore)

La misurazione dell'ampiezza e della frequenza delle vibrazioni è compito per specialisti: prevede l'uso di apparecchiature ragionevolmente sofisticate che forniscono dati la cui interpretazione richiede esperienza e conoscenze specifiche non comuni. L'uso di accelerometri commerciali che hanno frequenze naturali superiori a 25 Hz deve essere evitato in quanto questi strumenti non sono in grado di misurare disturbi a bassa frequenza che sono la causa principale della degradazione delle prestazioni della CMM.

Qualora sorgessero dubbi sulla presenza di vibrazioni eccessive si consiglia, prima di procedere a misurazioni complesse e costose, di eseguire una verifica semplificata consistente nel misurare il movimento relativo tra il canotto e la tavola della CMM, come suggerito al paragrafo 4.3 della norma ANSI B89.1.12M – 1990. Questo tipo di verifica non



## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

costituisce un metodo proprio per la misurazione dell'ampiezza delle vibrazioni ai fini della verifica di conformità con le specifiche del costruttore, ma produce risultati comunque relazionabili seppur in modo generico con l'ampiezza delle vibrazioni e rappresentativi pertanto dell'effetto delle vibrazioni stesse.

Per la misurazione del movimento relativo tra il canotto e la tavola è consigliato l'uso di sensori di posizione ad alta sensibilità oppure l'uso di interferometri Laser che dispongano dell'opzione per l'analisi dinamica.

La presenza di vibrazioni tra il canotto (o il tastatore) e la tavola della CMM può essere generata da forze esterne oppure da forze interne alla CMM stessa. Si consiglia quindi, prima di procedere ad analisi complesse, di verificare se le vibrazioni sono ancora presenti togliendo potenza agli eventuali servomotori di movimentazione degli assi.

Anche i pattini pneumostatici della CMM possono originare vibrazioni. Generalmente, se si annulla la pressione di alimentazione pneumatica, si riducono sensibilmente anche le vibrazioni indotte tra canotto e tavola da forze esterne; le vibrazioni possono essere imputate ai pattini pneumostatici se esse vengono minimizzate con piccole riduzioni della pressione di alimentazione pneumatica.

### **8.6 Alimentazione elettrica**

La presenza di disturbi elettrici sulla rete di alimentazione così come l'alimentazione elettrica con tensione o frequenza al di fuori delle specifiche del costruttore può essere origine di gravi limitazioni di funzionamento della CMM.

In linea generale, è più probabile che l'alimentazione elettrica fuori specifica provochi condizioni saltuarie di cattivo funzionamento evidente, piuttosto che incertezze di misurazione.

Si ricorda che la presenza saltuaria di picchi di tensione e interruzioni di breve durata dell'alimentazione, di disturbi intermittenti può difficilmente essere verificata con strumenti convenzionali come voltmetri o oscilloscopi. L'analisi approfondita può essere realizzata solo con strumentazione specifica (come ad esempio il Dranetz).

Qualora si sospetti che la rete di alimentazione elettrica sia l'origine di cattivo funzionamento della CMM si consiglia di procedere inizialmente alla verifica del dimensionamento di potenza della rete ed alla verifica del collegamento a terra della macchina.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

L'installazione di un trasformatore di isolamento, con schermo indipendente collegato a massa, si rivela spesso come una buona soluzione pratica per la riduzione dei problemi legati alla alimentazione elettrica.

### 8.7 *Alimentazione pneumatica*

Valori dei parametri caratteristici dell'aria di alimentazione del circuito pneumatico fuori dalle specifiche del costruttore possono degradare sensibilmente le prestazioni e la stessa vita utile della CMM.

Variazioni del valore medio della pressione di alimentazione pneumatica possono provocare alterazione nell'ortogonalità tra gli assi della CMM e derive di posizione.

Eccessivi gradienti termici tra l'aria compressa di alimentazione e la temperatura ambiente possono generare gradienti termici sulla CMM.

La presenza di particelle di olio o di acqua può degradare le prestazioni dei pattini pneumostatici ed in presenza di cilindri bilanciatori indurre vibrazioni sugli assi .

Per l'alimentazione pneumatica, il costruttore della CMM deve fornire la specifica di tutti i parametri richiesti per il funzionamento della CMM che devono comprendere: la temperatura media, il campo di variazione della temperatura media, la pressione, la variazione di pressione, il consumo ed il grado di purezza dell'aria.

La verifica prevede l'uso di un manometro, di un misuratore di flusso e di un termometro.

La verifica preliminare delle variazioni di pressione può essere realizzata utilizzando il manometro che equipaggia la CMM stessa.

La verifica completa è di responsabilità dell'utilizzatore. Deve essere eseguita solo se esistono ragionevoli dubbi che l'alimentazione pneumatica sia la causa di mal funzionamento della CMM.

Si ricorda che, a bordo della CMM, la pressione viene stabilizzata con regolatori di pressione e che questi sono efficaci solo se esiste un differenziale di pressione sufficientemente alto tra il loro ingresso e la loro uscita (tipicamente 0,8 bar). Se la pressione di alimentazione scende al di sotto dei limiti di specifica, la funzione di regolazione viene ridotta e può provocare variazioni difficilmente apprezzabili con la strumentazione in dotazione ma tali da provocare derive di posizione e variazioni di ortogonalità.

### 8.8 *Caratteristiche metrologiche delle sale per CMM*

Vengono riportate, a titolo informativo, le specifiche relative alle condizioni ambientali di una sala metrologica dimensionale prescritte dalla norma UNI 9052 – *Criteri base per le procedure di taratura dimensionale*.

Le condizioni di riferimento sono determinate dalla cosiddetta aria standard (20 °C, 101 325 Pa, 1 333 Pa di pressione parziale di vapor d'acqua, 300 ppm del volume di anidride carbonica).

#### 8.8.1 *Ambiente*

Le condizioni ambientali di una sala metrologica dimensionale dipendono dal livello di incertezza atteso dalle misure, dai metodi di misurazione e dalla condizione di riferimento per le grandezze di influenza dei misurandi e dei campioni o strumenti impiegati. Le condizioni specificate di seguito rappresentano il requisito minimo per una sala metrologica dimensionale.

Condizionamento termico ( $20 \pm 1$  °C); le oscillazioni della temperatura attorno al punto di regolazione devono avere costante di tempo superiore a 1 h se il limite di controllo è 0,5 °C, 2 h se il limite di controllo è di 1 °C; l'uniformità termica delle zone ospitanti la strumentazione può essere migliorata rispetto alle condizioni generali della sala metrologica mediante opportune schermature delle sorgenti di calore, tenendo presente le dimensioni massime da misurare e quindi l'entità delle possibili perturbazioni; l'umidità relativa deve essere minore del 50%.

I disturbi elettromagnetici devono essere eliminati o filtrati in modo da non alterare il comportamento tipico degli strumenti.

L'isolamento dalle vibrazioni deve raggiungere un livello tale che queste non modifichino significativamente la ripetibilità dei valori degli strumenti; un valore di frequenza di taglio superiore consigliato è di 4 Hz con una accelerazione minore di  $0,001 \text{ m/s}^2$  nel campo fino a 50 Hz.

Deve essere disponibile una struttura di appoggio della strumentazione sufficientemente rigida e insensibile alla variazione della distribuzione dei carichi sul pavimento della sala. Le deformazioni dovute allo spostamento di un carico maggiore di 150 kg devono risultare tali da non alterare la ripetibilità delle misure.

L'illuminazione deve essere diffusa in modo da non creare delle ombre, possibilmente schermata per eliminare le radiazioni non appartenenti allo spettro visivo.

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Il numero delle particelle sospese nell'aria non deve essere maggiore di  $6 \times 10^6 / \text{m}^3$  per quelle di diametro maggiore di  $1 \mu\text{m}$  e  $24 \times 10^6 / \text{m}^3$  per quelle di diametro compreso tra 0,5 e  $1 \mu\text{m}$ .

## 9 BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI

---

### 9.1 *Norme*

UNI EN ISO 14638:2015 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Modello di matrice

UNI EN ISO 1:2016 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Temperatura normale di riferimento per la specifica di proprietà geometriche e dimensionali;

UNI CEI 70099:2008 — Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM) (op. JCGM 200 (VIM), International Vocabulary of Metrology — Basic and general concepts and associated terms, BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, 2012, 3rd edition - 2008 version with minor corrections)

UNI EN ISO 10360-1:2005 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Prove di accettazione e prove di riverifica per macchine per misurazione a coordinate (CMM) - Parte 1: Vocabolario .

UNI EN ISO 10360-2:2010 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Prove di accettazione e prove di verifica periodica per macchine di misura a coordinate (CMM) - Parte 2: CMM utilizzate per misurazioni dimensionali lineari .

ASME B89.6.2 – Temperature and Humidity Environment for Dimensional Measurement

UNI ISO/TR 16015:2006 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Errori sistematici e contributi all'incertezza di misura dovuti a fattori d'influenza di natura termica nelle misurazioni di lunghezza.

JCGM 100:2008 — Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)

EA-4/02 M:2013      Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration

UNI EN ISO 3650:2002 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Campioni di lunghezza - Blocchetti pianparalleli .

UNI EN ISO 14253-1:2013 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Verifica mediante misurazione dei pezzi lavorati e delle apparecchiature per misura - Parte 1: Regole decisionali per provare la conformità o non conformità rispetto alle specifiche .

UNI ENV ISO 14253-2: 2011 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Verifica mediante misurazione dei pezzi lavorati e delle apparecchiature di misura - Parte 2: Guida

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

per la stima dell'incertezza nelle misurazioni GPS, nella taratura delle apparecchiature di misura e nella verifica dei prodotti .

UNI 9052:1987 Criteri base per le procedure di taratura dimensionale

UNI EN ISO 8015:2011 — Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Principi fondamentali - Concetti, principi e regole

## 9.2 *Articoli e testi*

Renato Ottone, TEMPO DI STABILIZZAZIONE DEL PEZZO, **Probing<sup>3</sup> N°1 – Giugno 1999**. Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

Gianfranco Costelli, CALIBRI PER VERIFICHE INTERMEDIE SULLE MACCHINE DI MISURA A COORDINATE (CMM), **Probing N°2 Novembre 1999**. Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

Alessandro Balsamo, DOVE MISURARE TEMPERATURE PER MISURARE DIMENSIONI, **Probing N°8, Gennaio 2003**. Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

Richard Duncan, Traduzione di G. Costelli e A. Balsamo, L'IRRAGGIAMENTO, QUESTO SCONOSCIUTO, **Probing 10, Maggio 2004**, Estratto per Probing da: R. Duncan, Requirements for Precision Dimensional Measurement, The Australian Metrologist, n°31:18-22, ottobre 2003, autorizzato dall'autore e dall'editore. Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

Gianfranco Costelli, STIMA DELL'INCERTEZZA DI UN PROCESSO DI MISURAZIONE CON CMM, **Probing N°10, Maggio 2004**. Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

Annarita Lazzari, COMPENSAZIONE TERMICA DELLE CMM IN AMBIENTE DI PRODUZIONE, **Probing N°14, Novembre 2007** Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

Giovanni Martelli, Feliciano Bisceglia, Renato Marsura, CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI UNA SALA METROLOGICA 3D - L'ESEMPIO DI UN UTILIZZATORE INDUSTRIALE, **Probing N°14 Dicembre 2007**. Articolo disponibile sul sito [www.cmmclub.it](http://www.cmmclub.it) **Probing Online**.

---

<sup>3</sup> Notiziario semestrale di tecnica ed informazione dell'Associazione CMM Club Italia

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

G. Malagola, A. Ponterio, “La metrologia dimensionale per l’industria meccanica”, Edizioni Augusta, Edizioni Mortarino, Torino 2004 ([www.metrologiadimensionale.it](http://www.metrologiadimensionale.it))

# EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

## 10 Coefficienti di dilatazione termica lineare dei materiali

MATERIALE	COMPOSIZIONE CHIMICA	CDT (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
<b>Acciai</b>		
Acciaio a basso tenore di carbonio	C8 ÷ C12	11,4
Acciaio a medio tenore di carbonio	C40 ÷ C50	10,7
Acciaio ad alto tenore di carbonio	C80 ÷ C160	12,2
Acciaio ad alta resistenza	0,12C-0,8Mn-1,0Ni-0,5Cr-0,4Mo	12,7
Acciaio da cementazione AISI 8620	20NiCrMo2	11,2
Acciaio al cromo	G30Mn7Cr105	12,6
Acciaio al cromo molibdeno	G40Mn7Cr105Mo25	12,3
Acciaio al nichel cromo	(0,25÷0,55)C-(1,0÷5,0)Ni-(0,3÷2,0) Cr	13,3
Acciaio inossidabile martensitico	X15Cr12	9,9
Acciaio inossidabile martensitico AISI 440 C	X105CrMo18	10,2
Acciaio inossidabile ferritico	X8Cr13	10,8
Acciaio inossidabile austenitico	Cr19Ni9	17,3
Acciaio al manganese tipo Hadfields	(0,8÷1,4)C-(10÷15)Mn	13,9
Acciaio Inconel (lega 600)	76Ni-15,5Cr-8Fe	13,3
Acciaio Inconel 800	46Fe-21Cr-32Ni-0,4Al-0,4Ti	14,2
Acciaio Hastelloy X	47Ni-22Cr-9Mo-0,6W-18,5Fe	13,9
Stellite 6B	52,8Co-30Cr-4,5W-3,0Ni-12C	13,9
Acciaio al silicio	C7Mn6÷15Si50÷400	13,5
Acciaio inossidabile per supporti sfere di qualifica SWIP	DIN X5CrNi18 9 AISI 304	16,0



## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Acciaio per utensili (SKD6)	X40Si1Cr5Mo1,2V0,4	10,8
<b>Ghise</b>		
Ghisa grigia	G280 ÷ G380	10,5
Ghisa sferoidale		10,0
<b>Metalli sinterizzati</b>		
Metallo duro	94WC-6Co	5,0
Metallo duro	88WC-5TiC-/co	5,0
Metallo duro	34WC-60TiC-6C	7,5
Carburo di tungsteno		4,2
<b>Leghe di rame</b>		
Ottone 7/3	Cu70Zn30	19,9
Ottone 6/4	Cu60Zn40	20,8
Bronzo fosfato	8Sn-0,2P-Cu(BAL)	18,2
Rame bianco	10Ni-1,4Fe-0,6Mn-Cu(BAL)	17,1
Rame al berilio	1,9Be-0,2Ni-Cu(BAL)	17,1
Ottone in getti	62Cu-2Pb-Zn(BAL)	20,2
<b>Leghe di nichel</b>		
Nichrome	80Ni-20Cr	17,3
<b>Leghe di alluminio</b>		
Duralluminio	Al-4Cu-0,6Mg-0,5Si-0,6Mn	23,4
<b>Materiali ceramici</b>		
Allumina (ossido di alluminio)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7
Cera Block BPP Mitutoyo		6,1
Ceramica BPP TESA		9,7

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Ceramica sfere SWIP (allumina policristallina)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	8,0
Rubino sintetico monocristallino (sfere SWIP)	99% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 1% $\text{Cr}_2\text{O}_3$	5,5
<b>Vetro e righe ottiche</b>		
Vetro		9,0
Jena ULM 01-600 D (DIADUR®)		8,0
Heidenhain DIADUR®		8,0
Heidenhain	Vari allestimenti: controllare catalogo	8,0÷10,0
ZERODUR®		0,05
<b>Elementi fondamentali</b>		
Alluminio	Al	23,1
Carbonio (diamante)	C	1,0
Carbonio (grafite)	C	2,6
Cromo	Cr	4,9
Rame	Cu	16,5
Oro	Au	14,2
Ferro	Fe	11,8
Piombo	Pb	28,9
Magnesio	Mg	24,8
Manganese	Mn	21,7
Molibdeno	Mo	4,8
Nichel	Ni	13,4
Silicio	Si	2,6
Argento	Ag	18,9
Stagno	Sn	22,0

## EFFETTI TERMICI NELLE MISURAZIONI DIMENSIONALI

Titania	Ti	8,6
Tungsteno	W	4,5
Vanadio	V	8,4
Zinco	Zn	30,2
Zirconio	Zr	5,7



# GUIDE TEMATICHE

